

**ДВОКАНАЛЬНА ЕКСТРЕМАЛЬНА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНА СИСТЕМА
АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ПАРАЛЕЛЬНО З'ЄДНАНИМИ
НАСОСАМИ ВОДОПОСТАЧАННЯ**

Бур'ян С.О., ас.

*Національний технічний університет України «Київський політехнічний
інститут»*

Вступ. Багатоагрегатні насосні установки, що використовуються у системах водопостачання, відносяться до числа найбільш енергоспоживаючих технологічних об'єктів. Так як енергоресурси країни постійно дорожчають, питанням енергоефективного керування насосних установок почали приділяти значної уваги. Саме тому, все у сфері водопостачання більш актуальним стає питання розробки та впровадження енергоощадливих та енергоефективних технологій. На практиці широке розповсюдження знайшли системи стабілізації напору та програмне керування насосами на основі графіків добового водоспоживання [1]. Інтерактивні алгоритми керування забезпечують автоматичний пошук мінімально-достатньої швидкості насосу, яка задовольняє потреби споживачів [2], [3]. Розглянуті вище способи забезпечують певний рівень енергозбереження, але оскільки робоча точка не завжди опиняється на лінії максимального ККД при використанні вищерозглянутих алгоритмів керування, енергоефективність системи може знижуватися. Ця задача розв'язується за допомогою екстремальної системи керування ККД насосної установки [4]. Але у багатьох випадках системи водопостачання не обмежуються одним насосом. Застосовуються послідовне, паралельне та змішане з'єднання для реалізації певних режимів роботи. Застосування екстремального керування для послідовного з'єднання насосів, один з яких керований за швидкістю, дозволяє підвищити ККД керованого насосу [5]. Цей алгоритм може бути застосований також для паралельного з'єднання агрегатів у поєднанні з мінімізацією втрат у частотно-керованому привідному асинхронному двигуні, з метою підвищення енергоефективності системи в цілому.

Мета роботи. Метою роботи є підвищення енергоефективності насосної установки з паралельно з'єднаними агрегатами на основі мінімізації втрат у приводному асинхронному двигуні та екстремального керування ККД насосу шляхом розробки двоканальної електромеханічної системи автоматичного керування. Працездатність системи перевіряється шляхом математичного моделювання.

Екстремальний алгоритм керування ККД некерованого насосу при паралельному з'єднанні керованого та некерованого агрегатів. При паралельному з'єднанні насосних агрегатів можливий варіант реалізації екстремального керування ККД для некерованого за швидкістю насосу за рахунок зміни швидкості частотно-керованого. Алгоритм для такого варіанту ілюструється на рис. 1.

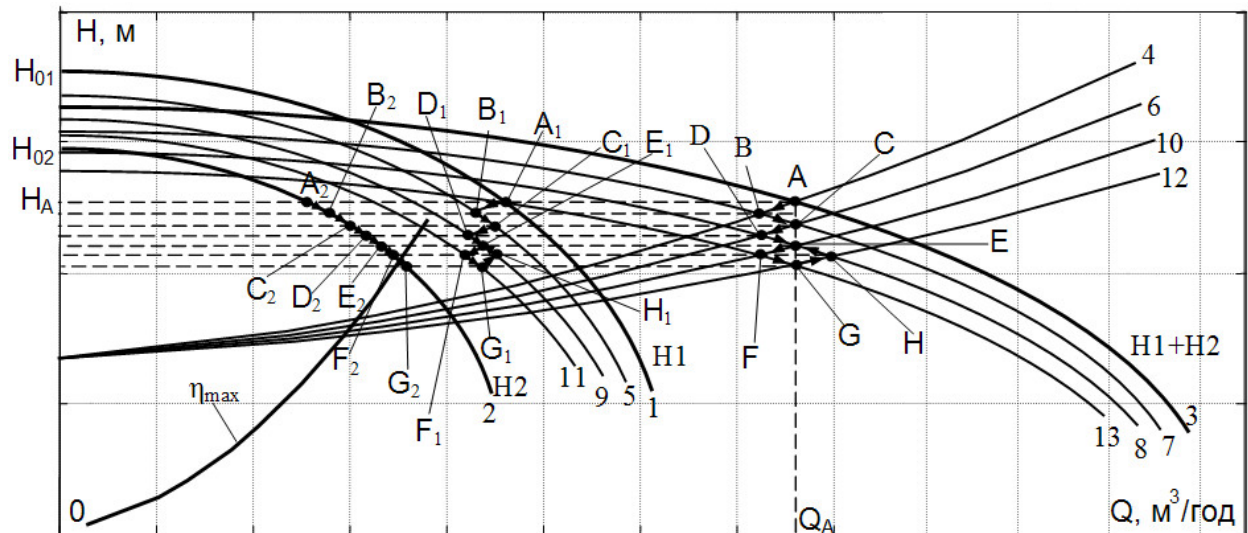


Рисунок 1 - Робота екстремального алгоритму при паралельному з'єднанні насосних агрегатів для нерегульованого за швидкістю насосу

Нехай робоча точка A_2 знаходиться зліва від лінії максимального ККД нерегульованого насосу N_2 . У момент часу T_0 екстремальний енергоефективний контролер зменшує швидкість обертання регульованого насосу на фіксоване значення $\Delta\omega$. Його напірна характеристика позначена 5, а сумарна характеристика обох насосів – 7. Робоча точка нерегульованого насосу переходить у B_2 .

З метою стабілізації продуктивності до значення Q_A споживачі змушені зменшити гідравлічний опір мережі до значення, при якому характеристика

мережі прийме вигляд 6. Робочі точки перейдуть у положення C , C_1 та C_2 (для нерегульованого насосу H_2). На наступному кроці алгоритму $2T_0$ контролер знову зменшить оберти першого насосу на фіксоване значення $\Delta\omega_1$ (характеристика 9, сумарна – 8) і перемістить робочі точки в D , D_1 та D_2 (для насосу H_2). Це викличе відповідну реакцію споживачів до стабілізації витрат води. Такий процес відбуватиметься доти, поки робоча точка насосу H_2 не виявиться праворуч кривої максимального ККД (точка G_2), тобто Q_2 стане більше Q_2^* . Після цього контролер фіксовано збільшить оберти цього насосу, що призведе до збільшення продуктивності та необхідності споживачам прикривати крани. У результаті робота першого насосу характеризуватиметься циклічною послідовністю наступних робочих точок $E_1 - F_1 - G_1 - H_1 - E_1$. Для нерегульованого насосу послідовність буде наступною $E_2 - F_2 - G_2 - F_2 - E_2$. У результаті роботи алгоритму ККД некерованого насоса буде коливатися в околі значення, що визначається продуктивністю в точці G .

Якщо споживачі не реагуватимуть на зміну продуктивності, то за рахунок руху по напірній характеристиці вправо, робоча точка також опиниться за лінією максимального ККД і далі буде рухатися в її околі за рахунок зміни швидкості обертання керованого насосу.

Математична модель екстремального контролера ККД нерегульованого насосу. Структурна схема екстремального контролера ККД нерегульованого насосу на основі алгоритму, робота якого зображена на рис. 1, представлена на рис. 2.

На структурній схемі введені наступні позначення: Q_2 – фактична виміряна продуктивність насосу нерегульованого насосу; Q_2^* – продуктивність нерегульованого насосу при якій забезпечується максимальний ККД (для окремого насосу – постійна величина, та як його швидкість незмінна, а на кожній напірній характеристиці існує тільки одне значення продуктивності, при якій забезпечується максимальний ККД); T_0 – період квантування екстремального контролера; Δf^* – необхідна величина зменшення завдання частоти регульованого насосу; K – параметр, що задає амплітуду зміни завдання частоти.

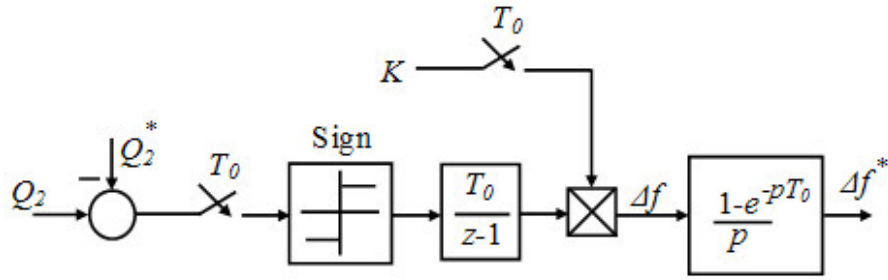


Рисунок 2 - Структурна схема екстремального енергоефективного регулятора ККД для нерегульованого за швидкістю насосу

Рівняння для вихідної заданої частоти на основі структурної схеми матиме вигляд

$$\Delta f = \frac{KT_0}{z-1} \text{sign}(Q_2 - Q_2^*). \quad (1)$$

Перетворимо рівняння (5) для запису у різницях

$$\Delta f((n+1)T_0) = \Delta f(nT_0) + KT_0 \text{sign}[Q_2(nT_0) - Q_2^*(nT_0)]. \quad (2)$$

Математична модель екстремального регулятора сумарних витрат частотно-керованого привідного асинхронного двигуна насосної установки. Екстремальні алгоритми керування ККД насосної установки підвищують її енергоефективність, але не враховують витрати потужності в привідному асинхронному двигуні. Адже в деяких режимах роботи ці витрати можуть значно перевищувати витрати у насосі, що суттєво знизить енергоефективність системи навіть при досягненні максимум ККД насосу.

Алгоритм керування сумарними витратами у асинхронному двигуні описаний та досліджений у [5] при роботі з одинарним насосом. Подамо математичну модель цього регулятора. Структурна схема, що відповідає роботі алгоритму показна на рис. 3.

Математична модель двоканальної екстремальної енергоефективної електромеханічної системи автоматичного керування насосною установкою для паралельного з'єднання агрегатів. Згідно алгоритму екстремального керування ККД некерованого насосу за рахунок керованого асинхронного двигуна при паралельному з'єднанні агрегатів та алгоритму екстремального керування сумарними витратами у двигуні структурна схема двоканальної екстремальної енергоефективної електромеханічної системи автоматичного керування насосною установкою для паралельного з'єднання агрегатів зображена на рис. 4.

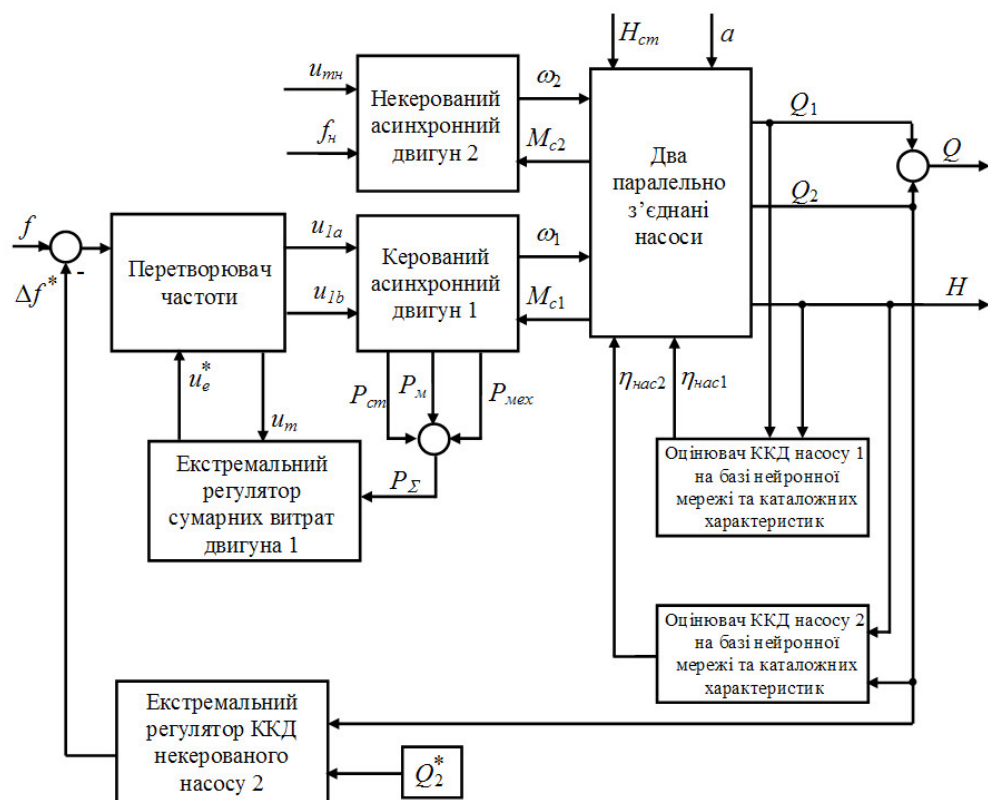


Рисунок 4 - Структурна схема двоканальної екстремальної системи керування насосною установкою у випадку паралельного з'єднання агрегатів

Асинхронні двигуни описуються системою нелінійних диференціальних рівнянь в нерухомій системі координат статора a-b [6]

$$di_{1a} / dt = -\gamma i_{1a} + \alpha \beta \psi_{2a} - \beta \omega p_n \psi_{2b} + u_{1a} / \sigma, \quad (7)$$

$$di_{1b} / dt = -\gamma i_{1b} + \alpha \beta \psi_{2b} + \beta \omega p_n \psi_{2a} + u_{1b} / \sigma, \quad (8)$$

$$d\psi_{2a} / dt = -\alpha \psi_{2a} + \omega p_n \psi_{2b} + \alpha L_m i_{1a}, \quad (9)$$

$$d\psi_{2b} / dt = -\alpha \psi_{2b} - \omega p_n \psi_{2a} + \alpha L_m i_{1b}, \quad (10)$$

$$M = (\psi_{2a}i_{1b} - \psi_{2b}i_{1a})3L_m / 2L_2, \quad (11)$$

$$d\omega / dt = (M - M_{\tilde{n}\dot{\omega}}) / J, \quad (12)$$

де $(i_{1a}, i_{1b})^T$, $(u_{1a}, u_{1b})^T$, $(\psi_{1a}, \psi_{1b})^T$ – компоненти векторів струму статора, напруги статора та потокозчеплення ротора; M – електромагнітний момент; $M_{\tilde{n}\dot{\omega}}$ – момент навантаження; ω – кутова швидкість; L_m – індуктивність намагнічуючого контуру, p_n – кількість пар полюсів. Додатні константи з виразів (7) – (12) визначаються наступним чином:

$$\alpha = R_2 / L_2, \quad \sigma = L_1 - L_m^2 / L_2, \quad \beta = L_m / \sigma L_2, \quad \gamma = R_1 / \sigma + \alpha \beta L_m,$$

де R_1 , R_2 , L_1 , L_2 – активні опори та індуктивності статора та ротора, J – повний момент інерції.

На вхід некерованого асинхронного двигуна подаються номінальна частота f_n та номінальна напруга u_{mn} .

Перетворювач частоти описується наступною системою рівнянь [5]

$$u_{1a} = u_m \cos \Theta, \quad (13)$$

$$u_{1b} = u_m \sin \Theta, \quad (14)$$

$$\Theta = 2\pi \int_0^t f dt, \quad (15)$$

$$u_m^* = u_0 + (u_{mi} - u_0)(f^*)^2 / f_i^2, \quad (16)$$

де u_m – амплітудне значення напруги; Θ – електричний кут; u_m^* – напруга завдання по амплітуді; f – частота напруги статора; f^* – частота завдання; u_0 – напруга зміщення, f_i – номінальна частота мережі.

Сигнали частоти та амплітуди обмежуються на рівні 50 Гц та 310 В відповідно. Інерційність каналів частоти та амплітуди моделюється аперіодичними ланками з малими сталими часу $T_{\mu 1}$, $T_{\mu 2}$ [5]

$$f = \frac{1}{T_{\mu 1}p + 1} f^*; \quad u_m = \frac{1}{T_{\mu 2}p + 1} u_m^*.$$

ККД насосів є нелінійними функціями, які залежать від положень робочих точок на напірних характеристиках $\eta_i = f(Q_i, H_i)$. В роботі ці залежності апроксимуються двошаровими нейронними мережами типу “feed-

forward backpropagation” з 10, 1 нейронами та функціями активації tansig, purelin у відповідних шарах [7]. Для навчання нейронних мереж використана база даних 4000 робочих точок з каталогу фірми виробника [8].

Математична модель двох паралельно працюючих насосів водопостачання разом з гідравлічною мережею описується наступною системою рівнянь [9]

$$H = H_{01i} \omega_1^2 / \omega_{i1}^2 - a_{i1} Q_1^2 - \chi_1 d Q_1 / dt, \quad (17)$$

$$H = H_{02i} \omega_2^2 / \omega_{i2}^2 - a_{i2} Q_2^2 - \chi_2 d Q_2 / dt, \quad (18)$$

$$H = H_{\tilde{n}0} + a Q^2 + \chi d Q / dt, \quad (19)$$

$$Q = Q_1 + Q_2, \quad (20)$$

$$M_{C1} = \rho g Q_1 H / \eta_{i \tilde{a} \tilde{n}1} \omega_1, \quad (21)$$

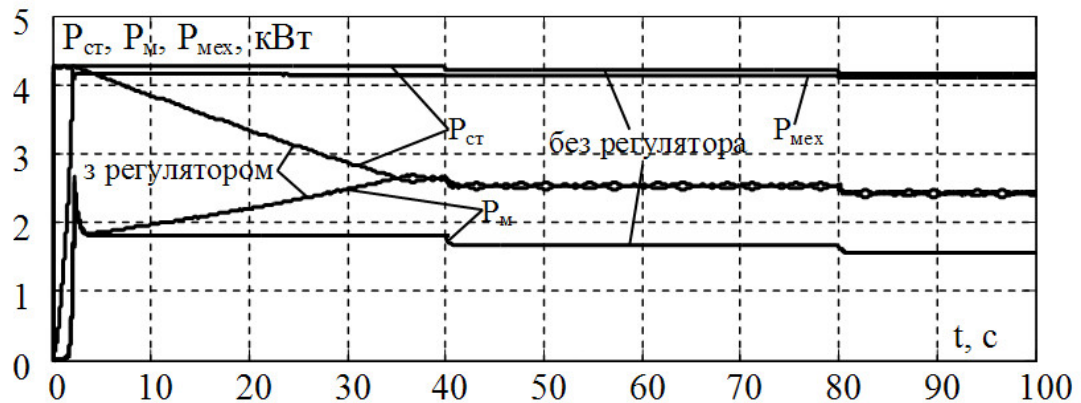
$$M_{C2} = \rho g Q_2 H / \eta_{i \tilde{a} \tilde{n}2} \omega_2, \quad (22)$$

де Q_1, Q_2 – продуктивності першого та другого насосів відповідно; Q – сумарна продуктивність першого та другого насосу; H_{01i} та H_{02i} – номінальні напори при нульових подачах першого та другого насосів при номінальних швидкостях відповідно; ω_1, ω_2 – швидкості обертання першого та другого насосів відповідно; ω_{i1}, ω_{i2} – номінальні швидкості обертання першого та другого насосів відповідно; χ_1, χ_2 – сталі часу інтегрування першого та другого насосів відповідно; χ – загальна стала часу інтегрування; $H_{\tilde{n}0}$ – геодезична висота підйому води; a_{i1}, a_{i2} – номінальні гідравлічні опори першого та другого насосів відповідно; a – гідравлічний опір мережі; M_{C1}, M_{C2} – моменти навантаження на валах двигунів першого та другого насосів відповідно; ρ – густина води; g – прискорення вільного падіння; $\eta_{i \tilde{a} \tilde{n}1}, \eta_{i \tilde{a} \tilde{n}2}$ – ККД першого та другого насосів відповідно; H – напір першого та другого насосу; t – час.

Структурна схема двох паралельно з’єднаних насосів, побудована на основі рівнянь (17) – (22), зображена на рис. 5.



a

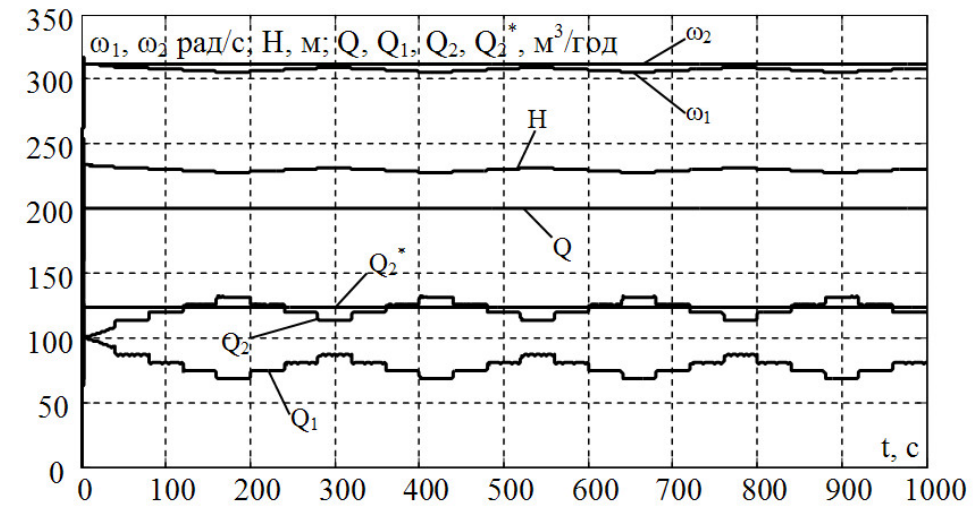


б

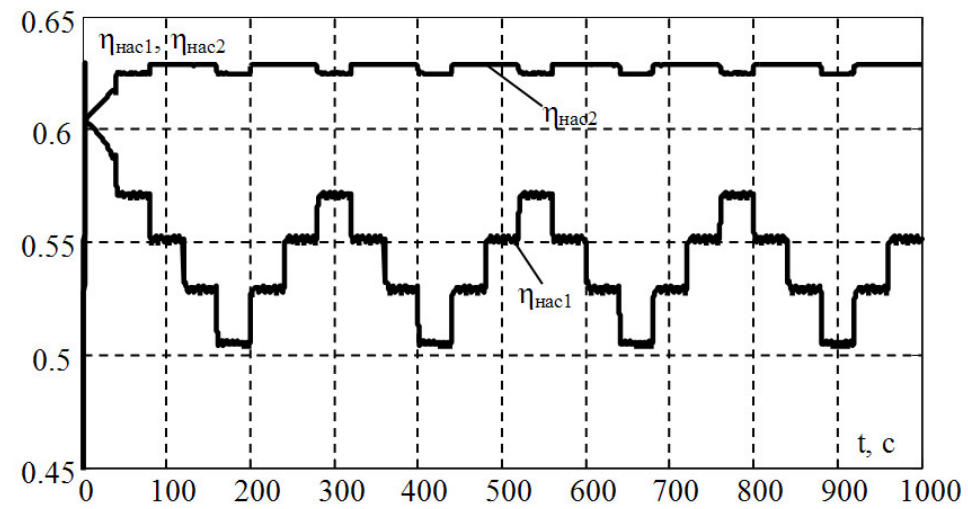
Рисунок 6 – Результати пуску двоканальної системи: *a* – перехідні процеси сумарних витрат у керованому асинхронному двигуні; *б* – перехідні процеси складових сумарних витрат

З рис. 6 видно, що при пуску системи починає працювати екстремальний регулятор сумарних витрат P_{Σ} зменшуючи їх до мінімально можливого значення. По завершенні процесу пошуку витрати коливаються навколо точки екстремуму, доки у час 40 секунд не починає діяти регулятор ККД некерованого насосу, зменшуючи частоту керованого. Як видно з рис. 6, *б*, процес пошуку екстремуму закінчується при знаходженні точки перетину складових сумарних витрат у сталі та міді. При роботі регулятора на першому кроці такту квантування регулятора ККД некерованого насосу витрати у двигуні зменшуються на 0.8 кВт (0.5% від номінальної потужності).

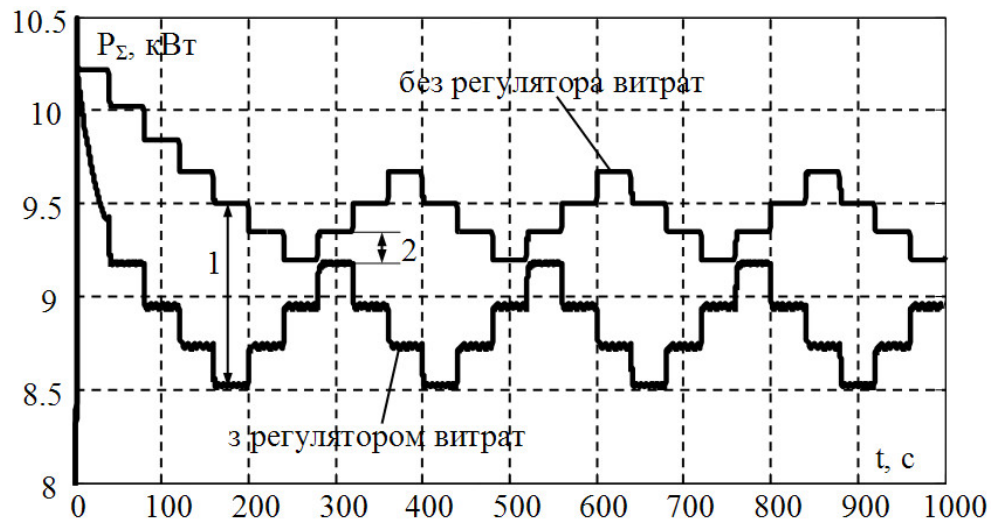
Робота двоканальної екстремальної системи автоматичного керування при реакції споживачів на зменшення продуктивності представлені на рис. 7.



a



б



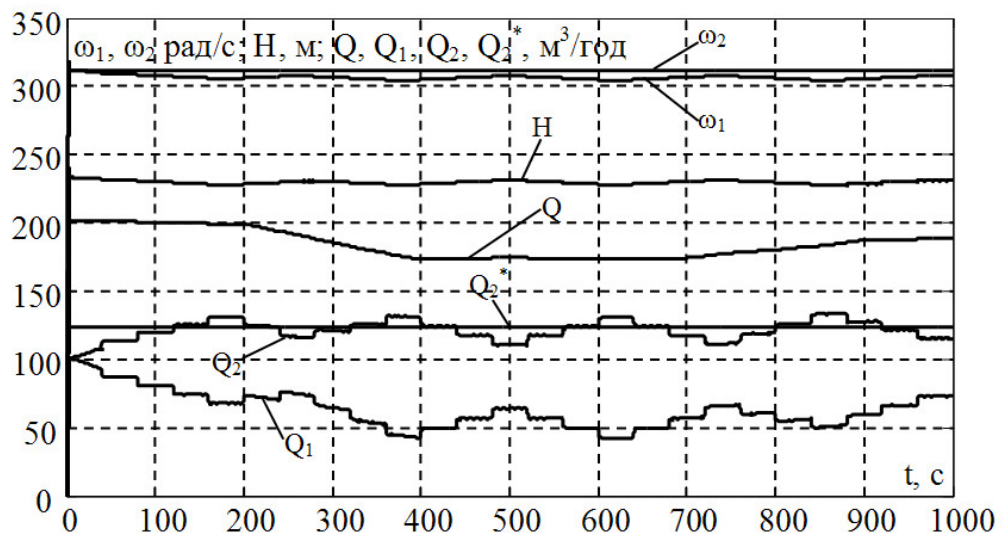
в

Рис. 7. Результати роботи двоканальної системи: *a* – перехідні процеси швидкостей, продуктивностей та напору насосів; *б* – перехідні процеси ККД керованого насоса $\eta_{нас1}$ та некерованого $\eta_{нас2}$; *в* – перехідні процеси сумарних витрат у асинхронному двигуні

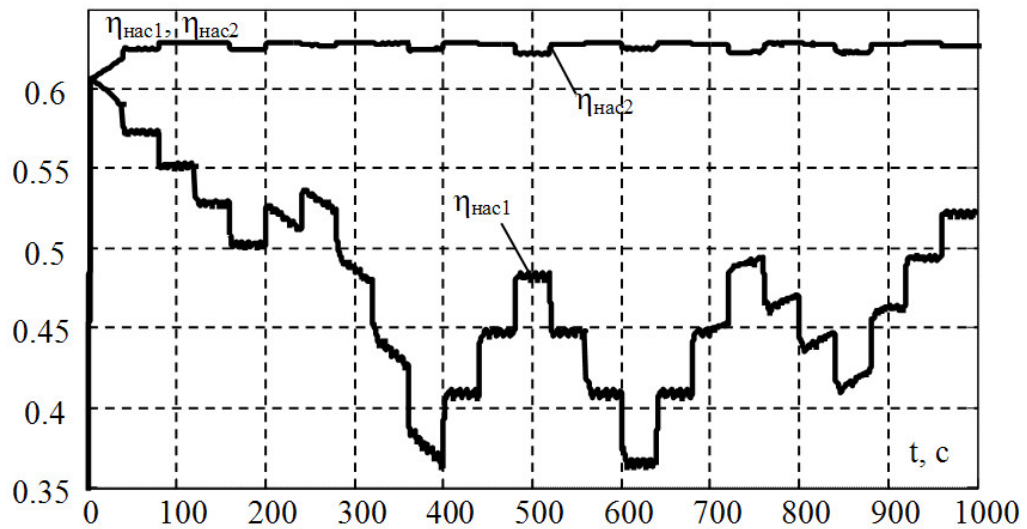
Як видно з рис. 7, а, після запуску системи починається пошук максимального ККД некерованого насосу. Так як Q_2 менша за Q_2^* , контролер зменшує швидкість керованого двигуна. Поведінка споживачів моделюється ПІ-регулятором гідравлічного опору мережі. Через декілька тактів квантування досягається умова $Q_2 > Q_2^*$, тоді контролер автоматично збільшує швидкість, доки Q_2 знову не стане менше за Q_2^* . Далі процес повторюється. Таким чином ККД некерованого насосу $\eta_{нас2}$ буде коливатися в околі максимального значення, ККД керованого насосу $\eta_{нас1}$ визначатиметься положенням робочої точки насосу, як видно на рис. 7, б.

На кожному кроці квантування екстремального регулятора ККД насосу працює другий канал регулювання сумарних витрат двигуна. Як видно з рис. 7, в, за рахунок роботи регулятора сумарних витрат на кожному такті квантування регулятора ККД різниця витрат у асинхронному двигуні становить від 0.15 кВт (0.1% від номінальної потужності) на ділянці 2 до 1 кВт (0.6% від номінальної потужності) на ділянці 1 у порівнянні з системою без регулятора витрат. При використанні двигунів більшої потужності ці величини зростатимуть.

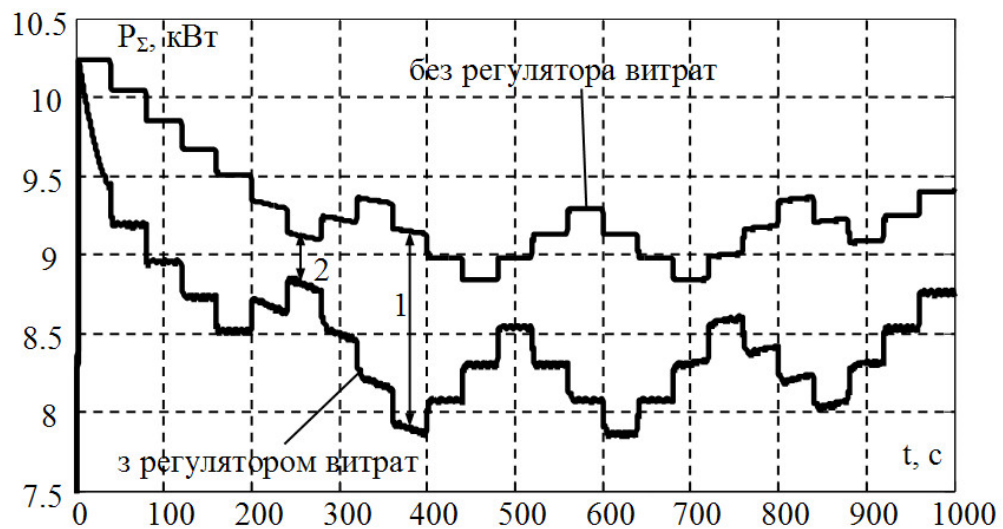
Робота двоканальної екстремальної системи автоматичного керування при відсутності реакції споживачів та раптовій зміні гідравлічного опору в мережі представлені на рис. 8.



а



б



в

Рис. 8. Результати роботи двоканальної системи при відсутності реакції споживачів та раптовій зміні гідравлічного опору: *а* – перехідні процеси швидкостей, продуктивностей та напору насосів; *б* – перехідні процеси ККД керованого насосу $\eta_{\text{нас1}}$ та некерованого $\eta_{\text{нас2}}$; *в* – перехідні процеси сумарних витрат у асинхронному двигуні

Як видно з рис. 8 система працює аналогічно попередньому випадку з різницею в тому, що не відбувається стабілізації продуктивності споживачами. Однак незважаючи на це алгоритм керування ККД некерованого насосу працездатний, тобто ККД насосу 2 після досягнення умови $Q_2 > Q_2^*$ коливається навколо максимального значення. У час 200 секунд відбулося раптове зменшення гідравлічного опору в мережі, а у 700 секунд – збільшення, причому

час зміни опору набагато більший за такт квантування екстремального алгоритму керування ККД, що призвело до виходу на нову робочу точку. З рис. 8, *а* та *б* видно, що алгоритм навіть у цьому випадку не втрачає своїх властивостей, що робить його нечутливим до зміни гідравлічного опору мережі.

Канал регулювання сумарних витрат дає зменшення витрат від 0.4 кВт (0.25% від номінальної потужності) на ділянці 2 до 1.2 кВт (0.75% від номінальної потужності) на ділянці 1 у порівнянні з системою без регулятора витрат.

Висновки. Розроблена двоканальна екстремальна електромеханічна система автоматичного керування паралельно з'єднаними насосами водопостачання, один з яких керований за частотою, забезпечує підвищення енергоефективності системи в цілому та зниження витрат потужності в керованому асинхронному двигуні. Дослідження показали, що екстремальний алгоритм керування ККД некерованого насоса працездатний при відсутності реакції споживачів на зміну продуктивності та є нечутливим до зміни гідравлічного опору мережі. У поєднанні з цим алгоритмом канал керування сумарними витратами у двигуні забезпечує зниження витрат енергії від 0.1% до 0.75% від номінальної потужності двигуна при різних режимах роботи.

Література

1. Kiselychnyk O., Bodson M., Werner H. Overview of energy efficient control solutions for water supply systems // Transactions of Kremenchuk State Polytechnic Univ. Kremenchuk: KSPU, N3/2009 (56), part 1, 2009. pp.40-45.
2. Попович М.Г., Кіселичник О.І., Бур'ян С.О., Соколовський О.Ф./ Експериментальні дослідження роботи інтерактивного енергозберігаючого контролера на гібридній моделі насосної установки// Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету імені Михайла Остроградського. Випуск 3/2007 (44). Частина 1. С.72-75.
3. Pechenik M., Kiselychnyk O., Buryan S. Experimental research of interactive energy saving controller of water supply pump based on flow rate measurement // Вісник НТУ «ХПІ». Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика – Х.: НТУ «ХПІ», 2010, №28, с. 272-274.

4. Бур'ян С.О., Грищук Т.В. Двоканальна екстремальна електромеханічна система автоматичного керування насосною установкою // Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика – Харків: НТУ «ХПІ», 2010, №28, с. 176-179.

5. Popovich M., Kiselychuk O., Buryan S. Extremal electromechanical control system of water supply pumps connected in series// Transactions of Kremenchuk State Univ. Kremenchuk: KSU, N3/2010 (62), part 2, 2010. pp.37-41.

6. Marino R., Peresada S. and Tomei P. Exponentially convergent rotor resistance estimation for induction motors// IEEE Trans.on Industrial Electronics. – 1995. – Vol. 42, No. 5. –P. 508-515.

7. Бур'ян С.О., Грищук Т.В. Оцінювач коефіцієнта корисної дії насосу на основі нейронної мережі та каталожних характеристик// Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації. Збірник наукових праць IX Міжнар. науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів у місті Кременчук 07-08 квітня 2011 р. – Кременчук, КНУ, 2011. – с. 97-98.

8. ITT Industries. Vogel Select CD// Selection Program Jan. 2009.

9. Попович М.Г., Кіселичник О.І. Проблеми теорії автоматизації багатоагрегатних насосних установок на основі принципу пасивності// Технічна електродинаміка. Проблеми сучасної електротехніки. Ч. 5. К-2006. стор.54-59.